

Determinación de las causas de falla en la ZAC de un Acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW*

Determination of Flaw Causes in ASTM A36 Steel's SMAW Welding Process HAZ

Artículo de Investigación científica - Fecha de Recepción: 30 de Marzo de 2013 - Fecha de Aceptación: 8 de Octubre de 2013

Mónica Isabel Melgarejo Rincón.

Ingeniero en Metalurgia. Magister en Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. Boyacá, Colombia. monica.melgarejo@uptc.edu.co.

Carlos Ramírez Martín

Físico. Magister en Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Universidad de Boyacá. Tunja. Boyacá, Colombia. cramirez@uniboyaca.edu.co

William Arnulfo Aperador Chaparro

Físico. Doctor en Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá D.C, Colombia. william.aperador@unimilitar.edu.co

Para citar este artículo / To reference this article:

M. Melgarejo, C. Ramírez-Martín, and W. Aperador, "Determinación de las causas de falla en la ZAC de un acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW," *INGE CUC*, vol. 9, no. 2, pp. 75–82, 2013.

Resumen: En este trabajo se presenta el estudio de una junta de acero ASTM A36 utilizado para el transporte de hidrocarburos y unido por el proceso de soldadura SMAW. Para la detección de discontinuidades en el cordón de soldadura y evaluación del grado de afectación del material próximo a la soldadura y su incidencia en la aparición de discontinuidades se utilizó la técnica de ultrasonido Phased Array. Las soldaduras fueron aplicadas siguiendo los parámetros establecidos en WPS. La zona de análisis se caracterizó mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido con el fin de determinar cambios microestructurales que incidan en la formación de la discontinuidad encontrada. Las propiedades mecánicas fueron evaluadas mediante un ensayo de dureza Rockwell C. El estudio demuestra cambios microestructurales del material base debidos a la elevación de temperaturas por encima del límite aconsejado por códigos, lo cual trae como consecuencia la formación de una discontinuidad lineal.

Palabras clave: hidrocarburos, SMAW, discontinuidad, ZAC, ultrasonido Phased Array.

Abstract: This paper presents the study of ASTM A36 steel joint used in the transportation of hydrocarbons and joined by the SMAW welding process. For discontinuity detection in the weld bead, an evaluation of the degree of affectation of the material near the weld, and the impact on the appearance of discontinuities, the ultrasonic non destructive technique known as Phased Array was used. The welds were applied according to the WPS (Welding Procedure Services) parameters. The area was characterized through optical microscopy and scanning electron microscopy analysis in order to determine microstructural changes influencing the formation of the discontinuity found. Mechanical properties were evaluated using the Rockwell C hardness test. The study demonstrates base material microstructural changes due to temperature increase above the limit recommended by codes, consequently, bringing as a result the formation of a linear discontinuity.

Keywords: Hydrocarbon, SMAW, discontinuity, HAZ, Phased Array ultrasonic technique.

* Artículo de Investigación derivado del proyecto de investigación titulado: "Fallas en la zona afectada por el calor de un acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW". Fecha de Inicio: 3 de Octubre de 2012. Fecha de Finalización: 7 de Agosto de 2013.

I. INTRODUCCIÓN

Los aceros microaleados de bajo carbono han sido desarrollados para diversas aplicaciones, entre las que se destacan la construcción de tubos de conducción de gas y petróleo, industria automovilística y naval. El desarrollo de estos aceros ha permitido aumentar tanto la resistencia a la tracción como la tenacidad lo cual ha permitido una reducción de peso en los diseños de los distintos componentes [1], [2].

En la industria de los hidrocarburos, el acero ASTM A36 es utilizado en la fabricación de tubería para el transporte de crudo y sus derivados, debido a que es un acero estructural con buenas propiedades mecánicas [3]. En los últimos años han sido muy estudiados los aceros, lo que ha permitido mejorar aún más las propiedades de los aceros microaleados convencionales. Para esto han sido desarrollados distintos métodos de laminación controlada, tratamientos termomecánicos y tratamientos térmicos intercríticos [4], [5].

Cuando se hace necesario efectuar una soldadura, tal como es bastante frecuente en las aplicaciones de estos aceros, el balance logrado en las propiedades de los mismos puede ser influenciado por el ciclo térmico provocado por el proceso de soldadura empleado [6], [7].

Durante las operaciones de soldadura y calentamiento normal llevadas a cabo sin estricto control de

las condiciones existe el riesgo de que el material se fragilice, y ocasione disminución en las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión [8].

Durante la construcción de una línea de conducción, la tubería es unida mediante procesos de soldadura que a futuro pueden originar problemas si no se efectúa de una forma adecuada y siguiendo un procedimiento calificado [9]. Uno de los procesos de soldadura más utilizado en campo es el SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) por economía y facilidad de trabajo [10].

Para la correcta ejecución de la soldadura deben tenerse en cuenta algunas consideraciones, como: velocidad de enfriamiento, condiciones de bajo hidrógeno en los electrodos y los múltiples pases durante la aplicación de la soldadura. La velocidad de enfriamiento es inversamente proporcional al máximo calor de entrada que puede ser tolerado por el material de una soldadura [11]. En la figura 1 se observan las diferentes zonas presentes durante la formación de un cordón de soldadura y el comportamiento de la temperatura [12].

Una zona de especial interés en la junta soldada corresponde a la zona afectada por el calor (ZAC), la cual experimenta altas temperaturas que originan cambios microestructurales en el material base durante la solidificación de la soldadura [13]. Frecuentemente las fallas en uniones soldadas son causadas por procesos de soldadura inapropiados o por una

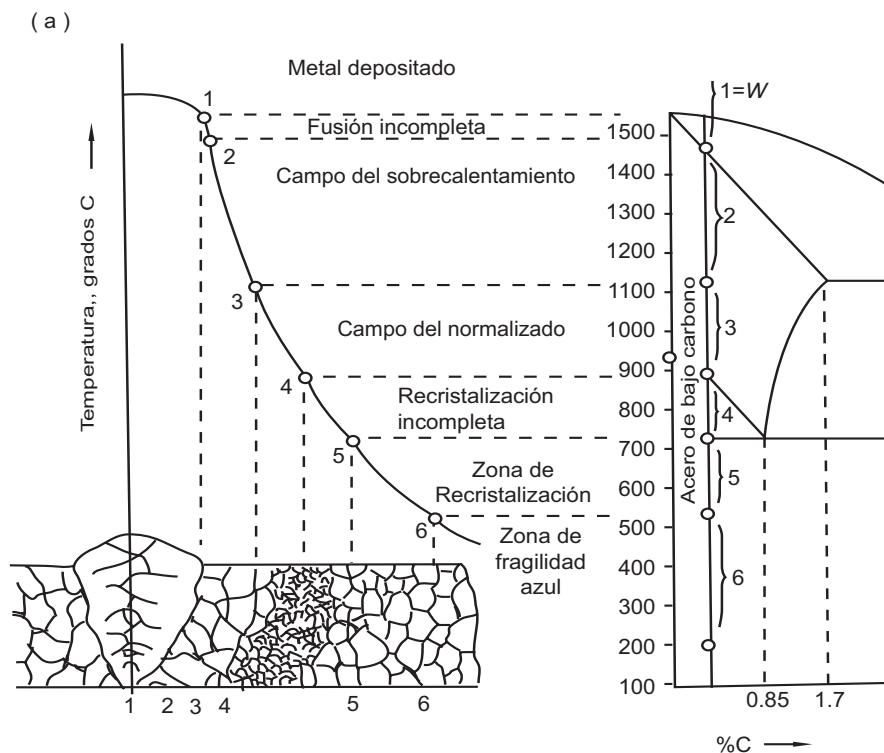


Figura 1. Solidificación progresiva del metal fundido en un depósito de soldadura [12]

concentración de esfuerzos [14]; para la detección de fallas se recurre a diferentes técnicas, entre las cuales se destacan los ensayos no destructivos [15].

En este estudio se realizó la evaluación de una soldadura SMAW en un acero estructural ASTM A36, en una línea de conducción de hidrocarburos para conocer en detalle la respuesta de la junta soldada, y se observaron cambios microestructurales en el material base, producidos por una elevación de temperatura que supera el límite aconsejado por códigos y, que dieron origen a una discontinuidad lineal.

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se seleccionó un tubo de acero ASTM A36 de 6" de diámetro unido a tope por soldadura tipo circunferencial bajo el proceso SMAW, con una corriente eléctrica de electrodo positivo CDEP de 130 A, voltaje de 30 V, un electrodo de raíz 6013 de 1/8" y un electrodo de relleno E7018 de 5/32" de diámetro. La soldadura se realizó siguiendo las especificaciones del procedimiento de soldadura WPS (*Welding Procedure Specification*).

La calificación de los procedimientos de soldadura fueron realizados y evaluados según las recomendaciones del código API 1104 [16], y para calificar la especificación del procedimiento de soldadura se utilizó el registro de calificación del procedimiento PQR: (*Procedure Qualification Record*). Las especificaciones del procedimiento de soldadura y la calificación del soldador se realizaron según las recomendaciones de la norma API 1104[16] y el código ASME, sección IX [17], respectivamente.

La inspección no destructiva de ultrasonido Phased Array se realizó siguiendo el código ASME, sección V, artículo IV, ASME B31.4 [18], las normas ASME E 2491-08 [19] y ASNT-TC-1A [21]. La calibración del equipo se realizó con un bloque IIW-V2. Para la calibración en distancia se utilizó una escalilla de 5 pasos; como acoplante se utilizó carbodimetil celulosa para permitir una alta transmisión en la señal del palpador al material.

Al cordón de soldadura se le realizaron cortes transversales para la preparación metalográfica de las muestras; de donde se obtuvieron cuatro probetas con un área de 1,0 cm².

La composición química se determinó con el espectrómetro de emisión DIA 2000, utilizando un patrón Fe 100. Se esmerilaron las muestras en sentido longitudinal hasta llegar aproximadamente a la mitad de su sección transversal, y se obtuvo una superficie plana, limpia, con rayas uniformes y paralelas.

El macroataque se realizó de dos formas: en una zona exterior de la soldadura y la ZAC, sin presencia de agrietamiento. El ensayo se efectuó según norma ASTM E 340, en el cual la probeta fue sumergida en una solución de ácido clorhídrico (50 %, HCl), mantenida a la temperatura de ebullición por un periodo de 15 minutos, luego fue retirada, lavada y secada. En

la otra muestra, el macroataque se realizó puliendo la muestra con papel abrasivo de varios grados hasta el número 600 y se procedió a atacar con ácido nítrico durante un tiempo aproximado de 10 segundos.

Para el análisis metalográfico se desbastó la superficie de la muestra con papel abrasivo de varios grados desde el número 80 hasta el número 1000; subsiguientemente se utilizó un paño microclouth con abrasivo de alúmina 0,25 µm hasta acabado especular y se atacó con nital al 5 % durante 5 segundos. Para la identificación de las fases y microestructuras presentes se realizó un barrido longitudinal de las probetas en el eje central utilizando un microscopio metalográfico NEOPHOT.

Las imágenes SEM fueron tomadas utilizando un microscopio electrónico de barrido, LEO 430 Digital Scanning Electron Microscopy con 15 kV, 1,2 nA y una presión de trabajo de 9,8 X 10⁻⁶ Torr.

El ensayo de dureza se realizó mediante un barrido a través de las distintas zonas de la unión soldada, tomando como referencia la línea de fusión, utilizando un durómetro Rockwell C, cuerpo penetrante, cono de diamante y carga de 150 kp.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Inspección Phased Array

Se determinaron los parámetros de inspección, como: especificaciones de material, espesor nominal, longitud de la superficie que se desea inspeccionar, temperatura de la superficie, estado superficial, información de posibles alteraciones de la estructura, y se realizó un barrido angular para encontrar posibles discontinuidades internas en la ZAC. La zona de análisis se presenta en la figura 2, donde se evidencia la presencia de una discontinuidad.

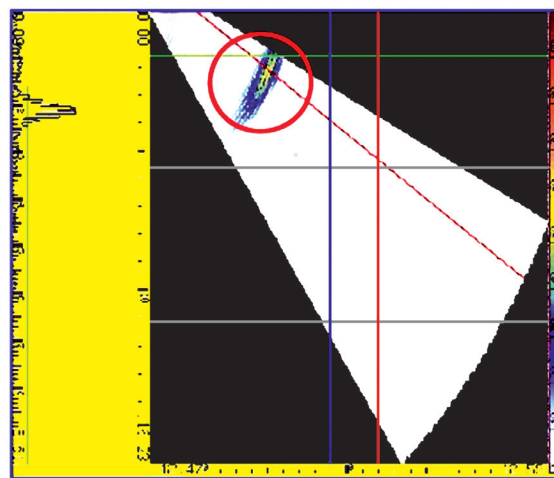


Figura 2. Imagen A-Scan y S-Scan Phased Array
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3 se observa la caracterización de la discontinuidad, la cual presenta una longitud de 56 mm.

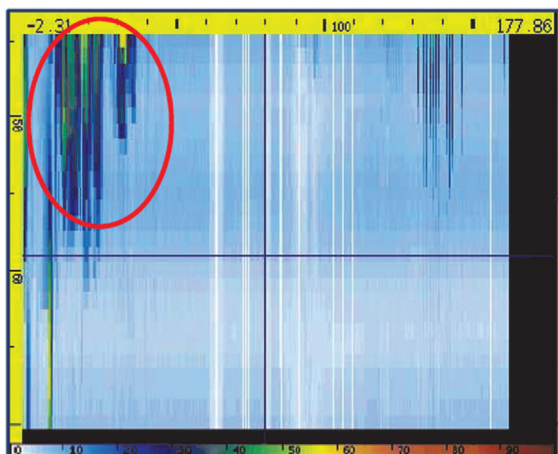


Figura 3. Imagen C-Scan Phased Array
Fuente: Elaboración propia.

La indicación de discontinuidad lineal determinada se clasificó como defecto dada sus características; el tubo fue retirado de servicio y utilizado para caracterización de la ZAC.

Los datos obtenidos del reporte de inspección por ultrasonido se presentan en la tabla 1.

TABLA I. REPORTE INSPECCIÓN ULTRASONIDO ACERO ASTM A36

IDENTIFICACION	ANGULO DEL PALPADOR	GANANCIA DIGITAL [dB]	ESPESOR MEDIDO [mm]	LONGITUD [mm]	PROFUNDIDAD DESDE SUPERFICIE [mm]	DESDE X=0 [mm]	DESDE Y=0 [mm]	EVALUACION DE LA DISCONTINUIDAD
GRIETA	45-70	20	5.56	58	2.06	0	10.0	R

El defecto lineal indicado por la inspección Phased Array fue rechazado bajo criterios de la norma API 1104 [16], la cual establece que una indicación lineal con longitud mayor a 0,8 mm es considerada un defecto y debe ser rechazado.

B. Composición química

Los resultados de la composición química para el metal base ASTM A 36 obtenidos con el espectrómetro de emisión se presenta en la tabla 2.

TABLA II. COMPOSICIÓN QUÍMICA METAL BASE ASTM A36

% C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Fe
0,25	0,93	0,011	0,013	0,181	<0,01	93

Los datos de la composición química de la ZAC se presentan en la tabla 3.

TABLA III. COMPOSICIÓN QUÍMICA ZAC. ACERO ASTM A36

% C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Fe
0,214	0,95	0,010	0,013	0,171	<0,01	98,5

Los anteriores resultados fueron comparados con la composición del acero estructural según la norma ASTM A36 [22], en dichos resultados se observa que la composición del metal se encuentra dentro de los parámetros establecidos en la norma y la composición de la ZAC no revela cambios significativos, de tal forma que durante el proceso de soldadura se presenta una redistribución en la microestructura sin cambios químicos. Además se encontraron trazas de otros elementos, como: Al, Co, Nb, Cr, Sn, Ti, V y W menores a 0,005.

C. Macroataque

Los resultados de la prueba de macroataque se observan en la figura 4. En la figura 4-A se puede distinguir con facilidad el metal de aporte en el centro, la ZAC y el metal base; en la figura 4-B se observan en detalle los diferentes pases de la soldadura, la línea de fusión y la ZAC en un tono oscuro.

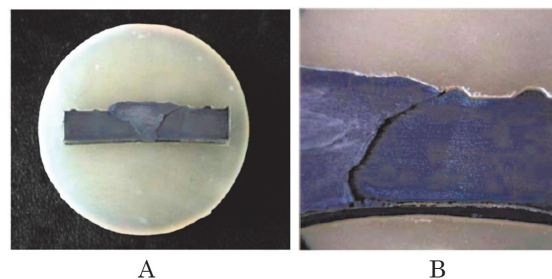


Figura 4. Macroataque de las juntas a tope directo con bisel en V

Fuente: Elaboración propia.

La evidencia de la presencia de la grieta ubicada en la ZAC, muy cerca de la línea de fusión, se presenta en la figura 5.

En la figura 5 se observa una diferenciación de las zonas objeto de estudio: la soldadura en tonalidad clara, la zona intermedia ZAC, el metal base en una tonalidad más oscura y la presencia de la grieta.

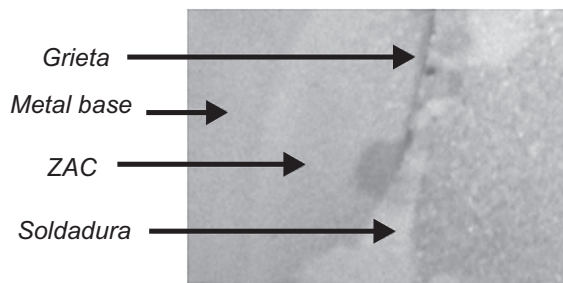


Figura 5. Macroataque a la ZAC con evidencia de grieta
Fuente: Elaboración propia.

D. Ensayos metalográficos

El análisis metalográfico se efectuó para determinar las características estructurales de la zona fundida y de la zona afectada por el calor. En la figura 6 se puede observar la formación de ocho zonas, que incluyen el metal base, la zona de recristalización, una zona de normalización, zona de sobrecalentamiento, línea de fusión, soldadura, zona de grieta y zona cercana a la grieta.

Zona de metal base. La figura 6a) muestra un tamaño de grano número 6 con un factor de corrección (500X) = +5, según la norma ASTM E112 [23].

La microestructura está constituida por perlita distribuida en forma de bandas que acreditan un proceso de laminado en la manufactura del material, ubicadas dentro de una matriz ferrítica con morfología equiaxial homogénea. Las características estructurales comprueban la morfología de un acero estructural ASTM A36 utilizado en la fabricación de tubería para el transporte de hidrocarburos.

Zona de recristalización incompleta. La figura 6b) evidencia un tamaño de grano número 6 con factor de corrección +5. Se puede observar que los granos de perlita se descomponen en granos más finos, debido a lo cual presentan coalescencia de perlita.

No se presentó cambio dimensional de consideración en los granos. Se sigue conservando la distribución de la perlita en bandas, pero en una forma más homogénea dentro de la ferrita con respecto a la morfología de la microestructura en el material base.

Esta zona experimentó una temperatura comprendida entre 720 a 910 °C y se encuentra ubicada a una distancia de 7 mm del eje central.

Zona de normalización. La figura 6c) presenta una notable disminución en el tamaño de grano, número 8 según la norma ASTM E112. Debido a la insuficiencia en el tiempo de calentamiento, no se produce crecimiento de granos austeníticos y el sub-

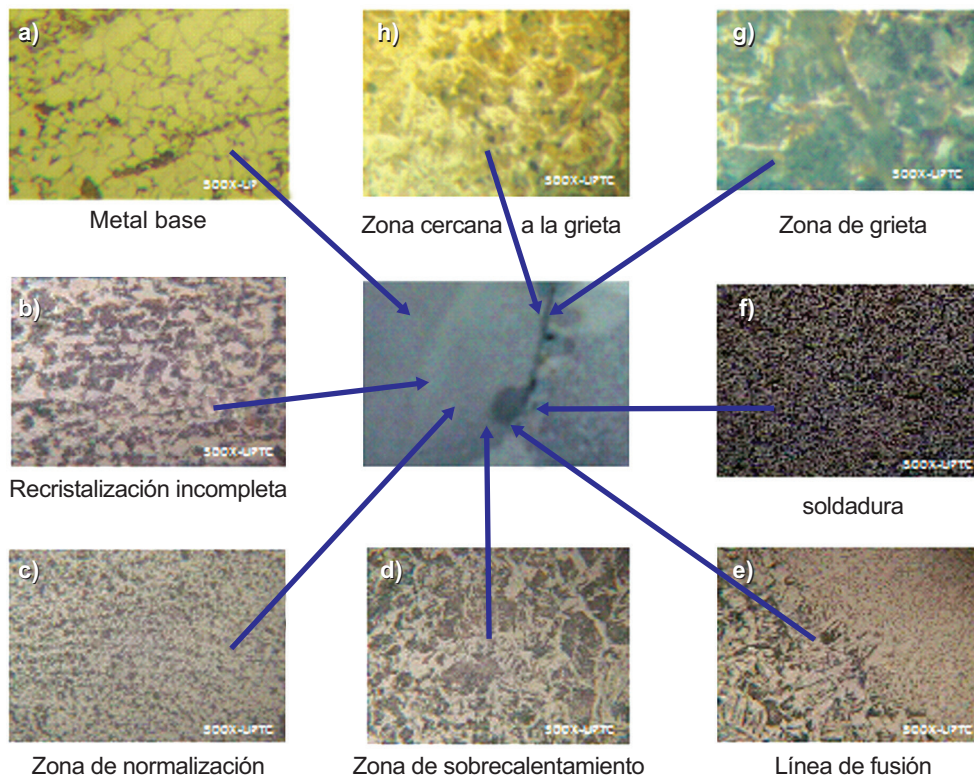


Figura 6. Perfil de las zonas microestructurales en las que se divide la junta soldada
Fuente: Elaboración propia.

siguiente enfriamiento deponen los granos finos de perlita y ferrita alotriomórfica. En esta zona se alcanzaron temperaturas de 1000 °C a una distancia de 6,12 mm del eje central de soldadura.

Zona de sobrecalentamiento. La figura 6d) revela un evidente aumento en el tamaño de grano, número 4, con factor de corrección +5. Se observa la transformación de ferrita alotriomórfica a ferrita acicular, ubicándose la perlita en los límites de grano. Lo anterior se presenta por una excesiva elevación de la temperatura cercana a los 1271 °C [25].

Línea de fusión. En la figura 6e) se puede observar una estructura de granos gruesos con agujas en forma de cristales entrelazados llamada “ferrita acicular”, producida en la última pasada de la soldadura y orientada con el residuo de las dendritas de la primera cristalización. Dentro de esta cristalización también podemos advertir la aparición de ferrita widmanstatten (en forma de placas y listones).

Zona de fusión. La figura 6f) se caracteriza por contener granos muy finos, aproximadamente número 8, compuestos de perlita distribuida homogéneamente en matriz ferrítica, característica del material de relleno (soldadura). En esta zona, la temperatura alcanza 1500 °C y se encuentra a una distancia de 4,35 mm del eje central de la soldadura.

Zona de la grieta. La figura 6g) se caracteriza por la presencia de ferrita widmanstatten primaria, la cual se origina en los límites de grano de la austenita (originada por la exposición a temperaturas mayores a la temperatura de transformación de fase) y crece en forma perpendicular a dichos bordes hacia el interior de la austenita.

Zona cercana a la grieta. En la figura 6h) se puede observar la presencia de ferrita widmanstatten primaria con precipitación de carburos alrededor de la grieta debido a la fragmentación del carbono durante la transformación de ferrita alotriomórfica a ferrita widmanstatten. La precipitación está presente en los límites de grano.

E. Ensayo de microscopía electrónica

De los resultados obtenidos con el microscopio electrónico de barrido se evidenció la presencia de una grieta según se observa en las figuras 6, 7 y 8.

La figura 7 muestra el borde de la grieta, el cual se caracteriza por tener ángulos vivos, que son rápidos propagadores de grietas debido a la concentración de esfuerzos presentes en los límites de grano y originados al momento de soldar.

Lo anteriormente mencionado se puede evidenciar en la figura 8. Se puede observar que la propagación de la grieta trasciende a través de los límites de grano; la figura 9 muestra en detalle el rompimiento de enlaces intergranulares lo cual provoca la propagación de la grieta.

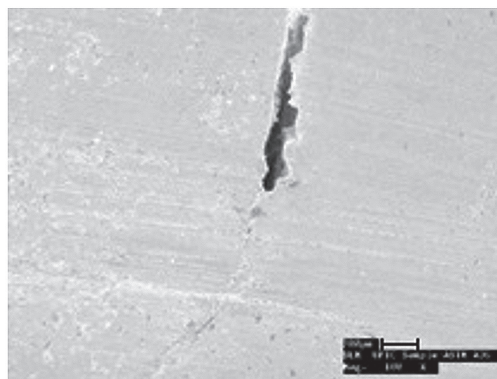


Figura 7. Micrografía grieta a 100X

Fuente: Elaboración propia.

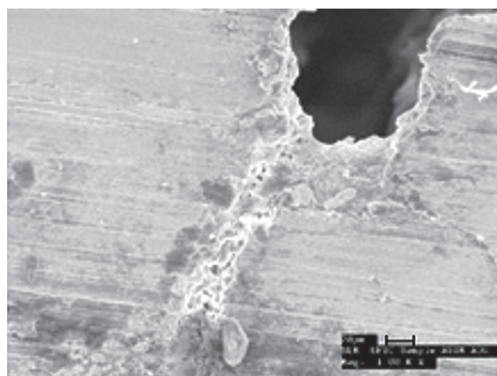


Figura 8. Micrografía grieta a 1.0 kX

Fuente: Elaboración propia.

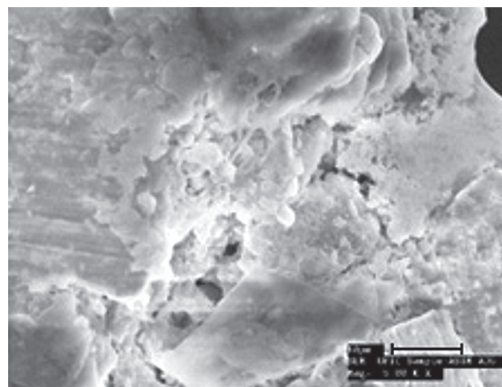


Figura 9. Micrografía grieta a 5.0 kX

Fuente: Elaboración propia.

F. Ensayo de dureza

Los resultados de dureza se presentan en la figura 10; la curva representa la variación de la dureza Rockwell C en función de la distancia al eje de la soldadura, donde la zona 1 corresponde a la soldadura, las zonas 2, 3 y 4 pertenecen a la ZAC y la zona 5 corresponde al metal base.

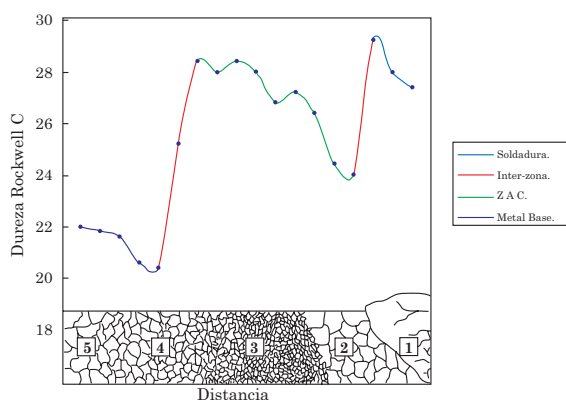


Figura 10. Perfil de dureza de un acero ASTM A36 soldado mediante SMAW
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10 se puede observar que el metal base experimentó diferentes cambios de dureza en las proximidades de la soldadura. Para las regiones más alejadas de la soldadura, el metal base sufrió un tratamiento térmico, lo cual conlleva una variación en la dureza para cada zona.

VII. CONCLUSIONES

La prueba de inspección Phased Array permitió detectar un defecto en la soldadura, lo que conllevó a una acción inmediata con el retiro del tubo en servicio y su posterior evaluación.

Los resultados obtenidos por espectrometría de emisión, para el metal base y la ZAC, no revelan cambios significativos, e indican que durante el proceso de soldadura se presentó una redistribución de la microestructura sin cambios químicos.

Las pruebas de macroataque revelan la presencia de una grieta ubicada en la zona de sobrecalentamiento muy cerca de la línea de fusión de la soldadura.

El análisis metalográfico muestra una transformación de la ferrita alotriomórfica a ferrita widmanstätten primaria, la cual se presenta por un cambio brusco en la temperatura de enfriamiento de la soldadura.

La zona de sobrecalentamiento de la ZAC presenta un tamaño de grano grande, lo cual contribuye a que los esfuerzos sean generadores y propagadores de grietas.

El aumento del tamaño de grano después de someter un material a elevadas temperaturas contribuye a un aumento en la fragilidad. Esto se puede evitar sometiendo la soldadura a un proceso térmico de recocido para alivio de tensiones.

Las imágenes SEM evidencian la formación de la grieta paralela al límite de grano, lo cual permite que las microfisuras se propaguen sin mucha derivación.

El análisis de dureza evidencia la relación de proporcionalidad directa entre dureza y fragilidad y su relación con el tamaño de grano.

REFERENCIAS

- [1] T. Tanaka, "The four stages of the thermomechanical processing in HSLA steels", presented at The Int. Conf. on High Strength Low Alloy Steels, Wollongong, Australia, 1984.
- [2] D. C. Horvath and J. R. Fekete, "Opportunities and challenges for increased usage of advanced strength steels in automotive applications", presented at The Int. Conf. on Advanced High Strength Sheet Steels For Automotive Applications, Winter Park, USA, 2004.
- [3] ASTM A36/A36M-00a. *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. United States: American Society for Testing and Materials, 2004, pp. 1-3.
- [4] R. Song *et al.*, "Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained BCC steels", *Materials Science and Engineering*, vol. 441, n° 1-2, pp. 1-17, December 2006.
- [5] P. D. Hodgson, M. R. Hickson, and R. K. Gibbs, "Ultrafine ferrite in low carbon steel", *Scripta Materialia*, vol. 40, n° 10, pp. 1179-1184, April 1999.
- [6] I. Hrivnak *et al.*, "Microfractographic analysis of the effect of the M-A constituent on the ductility and impact properties of welded joints", *Transactions of the Technical University of Kosice*, vol. 2, n° 1, pp. 13-22, July 1992.
- [7] E. Bonnevie *et al.*, "Morphological aspects of martensite-austenite constituents in intercritical and coarse grain heat affected zones of structural steels", *Materials Science and Engineering*, vol. 385, n° 1-2, pp. 352-358, November 2004.
- [8] C. Musauel *et al.*, "Caracterización por microscopía óptica y electrónica de una junta de acero inoxidable dúplex 2205, soldada por el proceso GMAW", *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, vol. 21, n° 2, pp. 61-73, Julio 2006.
- [9] J. Contreras, *Preparación para la calificación y certificación de inspectores de construcciones soldadas*. Bogotá, D.C.: Asociación Colombiana de Soldadura y Ensayos no Destructivos, 2008, p. 23.
- [10] J. Rodríguez, *Soldadura, producción y mantenimiento*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2002, pp. 62-73.
- [11] J. Torres, *Evaluación de la corrosión en soldadura de barras corrugadas de acero para concreto reforzado*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2006, pp. 52-97.
- [12] H. Horwitz, *Soldadura, aplicaciones y práctica*. México: Alfa Omega, 1990, pp. 515.
- [13] J.R. Davis, *Corrosion of weldments*. United States: ASM International, 2006, p. 2.
- [14] J. D. Osorio, H. Pacheco y A. Toro, "Efecto del tratamiento térmico post-soldadura sobre la microestructura del acero inoxidable grado CA6NM para la construcción de rodets hidráulicos", *Scientia et technical*, vol. 13, n° 36, pp. 901-906, septiembre de 2007.
- [15] ASME BPVC-V, *Nondestructive Examination*. United States: American Society of Mechanical Engineers, 2011, pp. 1-700.
- [16] API 1104, *Welding of Pipelines and Related Facilities*. Washington: American Petroleum Institute, 2012, pp. 1-46.
- [17] ASME, sección IX, *Elaboración y calificación de procedimientos de soldadura por fusión y soldadura fuerte, calificación de soldadores y operadores de máquinas de soldar*. New York: Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos, 1995, pp. 1-92.
- [18] ASME B 31.4, *Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2006, pp. 1-126.

- [19] ASME E 213-98, *Standard practice for ultrasonic examination of metal pipe and tubing*. United States: American Society of Mechanical Engineers, 1998, pp. 1-5.
- [20] ASME E 2491-08, *Standard guide for evaluating performance performance characteristics of phased-array ultrasonic examination instruments and systems*. United States: American Society for Testing and Materials, 2008, pp. 1-17.
- [21] ASNT-TC-1A, *Recommended practice*. Ohio: American Society for Nondestructive Testing, 1996, pp. 1-31.
- [22] ASTM A36/A 36M-04, *Standard, Specification for carbon structural steel*. United States: American Society for Testing and Materials, 2004, pp. 1-4.
- [23] ASTM E112, *Standard test methods for determining average grain size*. United States: American Society for Testing and Materials, 1988, pp. 862-881.